The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	速中性子照射に関する研究 その1 線量分布について
Author(s)	稲田, 哲雄; 平岡, 武; 羽部, 孝 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1969, 29(5), p. 520-528
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/14977
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

速中性子照射に関する研究（その1）
線量分布について

放射線医学総合研究所物理研究部
稲田哲雄，平岡　武，
羽部　孝，松沢秀夫，

（昭和43年12月12日受付）

Dose Distributions of Fast Neutrons from Thick Target ^{9}Be (d,n) ^{10}B Reaction

By

Tetsuo Inada, Takeshi Hiraoka, Takashi Habu and Hideo Matsuzawa
Physics Division, National Institute of Radiological Sciences
(Director: Dr. Tadashi Hashizume)

The possibility of the use of fast neutron, from thick target ^{9}Be (d,n) ^{10}B reaction with an electrostatic accelerater was examined as a conventional and stable source for irradiation.

The dosimetric quantities concerning with the therapeutic purpose were investigated and the following data were presented:

(1) Calculated and experimentally obtained results of depth dose distributions, which are in fair agreement.

(2) The dose rates due to fast neutrons at the surface of the target holder and at TSD of 20 cm are 400 rads/min. and 20 rads/min., respectively.

(3) A circular field of irradiation for therapy was obtained by the collimation at TSD of 20 cm and the corresponding dose distribution was given for the case in air and water phantom.

(4) The percent depth dose distribution along the central ray in water for the present neutrons collimated appears to be almost equal to that for 150 kV X-rays with 3 mm aluminium filter.

I. 緒　言

最近，速中性子による治療の可能性が再検討される機運にある．われわれも3 MeV ヴァンデグラーフ加速器を治療用速中性子線源として利用する目的で基礎的研究を進めてきた．治療を行うためには安定な中性子ビームによつて病巣に毎分数10 rad 以上の線量を与えなければならぬので，^{9}Be (d, n) ^{10}B 反応で発生する速中性子に着目した．そのエネルギースペクトルについては，飛行時間測定法による実験にもとづいて既に基礎的な検討がなされた[1]．

ここでは厚いベリリウム板に 2.8MeV 重陽子を入射させた際に発生する速中性子について，水ファントム中の線量分布，治療用照射筒，ＬＥＴと生物学的効果の関係などを検討する．

II. 中性子線源

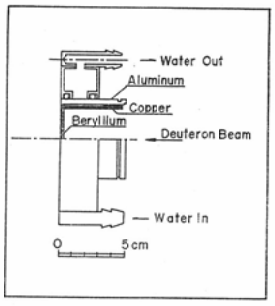
(1) ベリリウムターゲットおよび支持装置

サイクロトロンのような大規模な装置でなく加速エネルギー3 MeV 程度でも陽イオンの飛程以上の厚いターゲットを使用して10^{9}n/μA 程度の中性子線束が期待できる．μA は加速された陽イオンビーム電流単位である．ターゲット物質として

は中性子収率が高い低原子番号の核種が望ましいが，他方線量率が一定に保持されるためには高温，真空中において安定なものでなければならぬ．これらの条件を満足するターゲットとしてベリリウムが選ばれた．これは単体として入手でき，原子番号が低く，重陽子（Ed≒3 MeV）を入射させたときの中性子収率は単体リチウムについで高く，しかも高温に耐えうる．

厚いベリリウム板を真空中に保持して入射ビームの与える熱量に相応する適当な冷却ををおこなう装置（Target holder）が試作された．HVEC社*が製作したベリリウム板をアルミ円筒の底に圧着してその背面より強制水冷をおこなつた装置が始めに用いられた．これは1 kW 以上のビーム入射に耐えるが，発生した中性子は約13㎜の水層を通過したのちに利用される[1]ので，減速して放射分析をおこなう中性子線源として適している．

Fig. 1. Sectional view of thick target assembly.



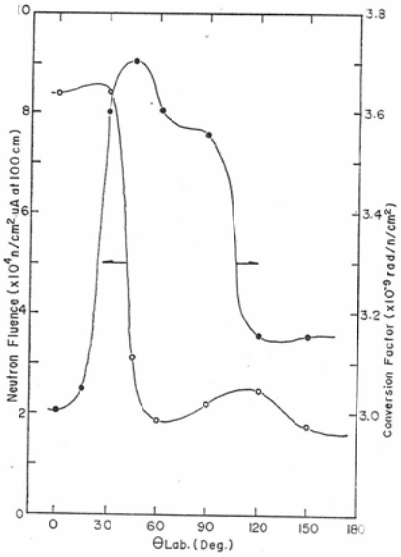
ターゲット周辺の水の存在を小さく抑え，前方の照射野における速中性子の近接照射またはコリメーターとともに使用することを考慮した簡単なターゲット支持器が試作された．Fig 1に示すようなものである．中性子は厚さ1㎜のベリリウム板および真輪壁を通過するがこれらによる速中性子の減速，減少効果は無視でき，ベリリウム板の交換が容易である．この装置では 500Wのビーム入射が可能である．

(2) 中性子収量およびスペクトル

発生する中性子収量は，ほぼ $Ed^{3/2}$（Edは重陽子の衝撃エネルギー）に比例し，Ed= 2.8 MeV

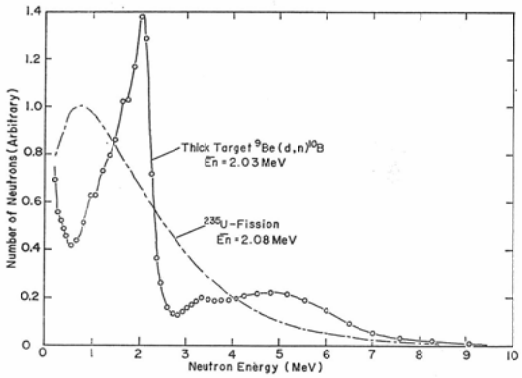
* High Voltage Engineering Co. (Burlington, Mass., USA)

Fig. 2. Angular distribution of neutron fluence produced by unit current of 2.8 MeV deuteron beam incidence on thick beryllium disk (closed circles), and of neutron fluence to dose conversion factors (open circles).



において 2.5×10^9n/μA の中性子束をえる．しかし，その線束密度の空間分布は非等方的でFig. 2（○印）に示すように前方の±30°以内の照射場で平坦なものでターゲットから 100㎝における線束密度は 8.5×10^4n/cm²•μA である．150μA の重陽子ビームを入射すれば 1.3×10^7n/cm²•sec (at 100㎝) をうることになる．Fig. 2の●印はそれぞれの角度に放出される中性子1個あたりの与える線量で first (single) collision を仮定して計算された値[2]に依つた．0°～30°の間でこの線量換算係数に20％の増加がみられ，これを考慮すれば線量分布の均等な照射場は前方の±15°の範囲内において与えられる．この場合では凡そ 2.3 rads/min. (at 100㎝) である．実際には加速電流が大きい場合，粒子の分析は困難で，ターゲットに入射する電流のうち数10％が中性子収率が低い重陽子の分子ビーム（d_2^+）であるために，実際の出力線量は上に求めたより小さな値になるであろう．それゆえ一般にターゲット電流から線量を求めることはできず，後述するような線量測定が必要になつてくる．

Fig. 3. Comparison of neutron spectrum shape between thick target $^{9}Be(d,n)^{10}B$ reaction and ^{235}U fission.



プラスチック・シンチレーターを検出器とした飛行時間測定からの中性子エネルギー分析[1]によると，その分布は8 MeV 附近にまで達する巾の広い連続スペクトルを示す．これは ^{235}U の核分裂中性子スペクトルと比較されて，Fig. 3に示されている．両者の中性子の平均エネルギーは何れも約2 MeV で一致している．

(3) 中性子線束の測定

中性子エネルギー分布，n(En) が Fig. 3のように求められており，それが連続で，充分高いエネルギーまで分布することから断面積がよく知られた中性子反応によりえられる放射化により入射中性子線束を求めることができた．

一般に反応断面積，σ(En) の中性子反応

$$X+n \xrightarrow{\sigma} Y+a$$

によつてターゲット核Xの原子数 M_X から生成核Yの原子数 M_Y をえたとき，入射した全中性子束は

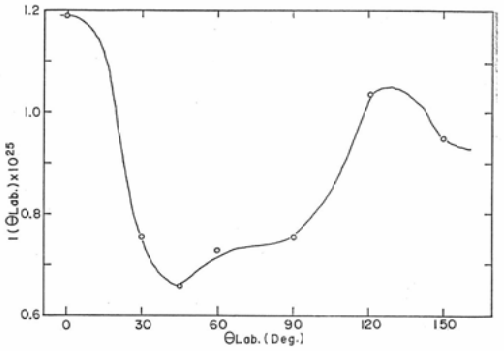
$$N=\frac{M_Y}{M_X}\cdot I \qquad (1)$$

で与えられる．ここで

$$I=\frac{\int_{o}^{E_n^{max}} n(En)\ dEdn}{\int_{o}^{E_n^{max}} \sigma(En)\cdot n(En)dEn} \qquad (2)$$

は入射中性子スペクトル，n(En) に対する中性子反応の effective な断面積の逆数である．(2)

Fig. 4. I, the reciprocal of the effective cross sections of reaction, $^{32}S(n,p)^{32}P$, versus emission angle.



式から，その中性子反応について中性子スペクトルが決れば，Iは定数である．

反応確率，生成放射能強度，半減期の点で，

$$^{32}S+n \longrightarrow {}^{32}P+p$$

による ^{32}P 形成反応がもつともこの場合に適したものであつた．硫黄の 0.5gr 程度の錠剤状に圧縮成型したものが被照射体の表面に貼布して用いられた．速中性子の分布を乱さずに，小型，軽量で，被照射体の些細な動きによる入射線束の変化も検出でき，照射野が小さい場合に有利であつた．Ed= 2.8MeV における ^{9}Be (d, n) 反応中性子に対するこの ^{32}P 生成反応のI値は Fig. 4に示すような値をとり，ターゲットからの中性子の発生する角度によりそのスペクトル，n (En) が変るためにI値も変動する．用いた硫黄原子数に対して生じた ^{32}P 原子数の比 Mp/Ms と上のI値から (2)式によつて全入射中性子束，Nをえた．

III. 線量評価

(1) 中性子線束から線量への換算

入射中性子から Tissue に与えられるエネルギーはモンテ・カルロ計算により精度よく求められるようになつた．ここで問題とする中性子エネルギー範囲に対しては Snyder, Neufeld の計算[2]がある．これは熱中性子から10MeV までの中性子について厚さ30cmの無限 Tissue 平板に垂直に入射した場合の深部線量と，中性子の散乱が無視できる条件で照射された Tissue 物質における線量 (first collision dose) を求めたもので，いくつか

の仮定によつている．

最近，Irving et al[3] は ref. (2) の計算における近似部分を詳細に求め直し，新たな資料と大容量の計算機とを用いて，0.5～60MeV に亘つての単色中性子に対する線量換算値を求めた．その結果によると，厚さ30cmの Tissue 平板についての平均線量は1 MeV において ref. (2)のそれと一致しているが，中性子エネルギーの増加とともに差を生じて10MeV では約20%低くなることが知られた．したがつて first collision dose の計算では ref. (2)で用いた仮定がほぼ成立するので問題がないが，深部線量の計算には ref. (3)の換算値を用いることにする．

エネルギー En で入射した中性子が組織中の深さ t において与える線量を D(En, t) とすると，スペクトル，n(En) の中性子の入射によつて深さ t に与える線量は

$$D(t)=N\frac{\int D(En,\ t)\,n(En)\,dEn}{\int n(En)\,dEn} \qquad (3)$$

で与えられる．ここで D(En, t) は上述の換算値を En について内挿して求められ，Nは前節（II，(3)）の^{32}P の生成量からえられる．(3)式の積分をおこなうために，いくつかの深部位置における D(t) の変化が En に対する函数として求められた．すなわち ref. (3)にしたがつて厚さ30cmの Tissue 平板全面に垂直かつ一様に入射 (normally incident) した場合，および平板前面の一点から4πに等方的に入射(isotropically incident) した場合とに分けて，いくつかの深さにおいて内挿をおこない，エネルギー賦与を入射中性子エネルギーの函数として求めた．これらの結果と Fig. 3 に与えたスペクトルとを用いて (3)式の計算をおこなつた．その結果は Fig. 5 および Fig. 6 に示すようなもので，厚いベリリウム板を 2.8MeV 重陽子で衝撃したときに発生する中性子による深部線量，D(t) をそれぞれ normally incident および isotropically incident の場合について与える．なお，Fig. 5 における深さゼロでの●印は比較のために first collision dose (ref. 2）による線量値を示したものである．また平均

Fig. 5. Depth dose in 30 cm thick tissue calculated for the normally incident neutrons from thick target ^{9}Be(d,n)^{10}B reaction. Histogram for 2 MeV normally incident neutrons.

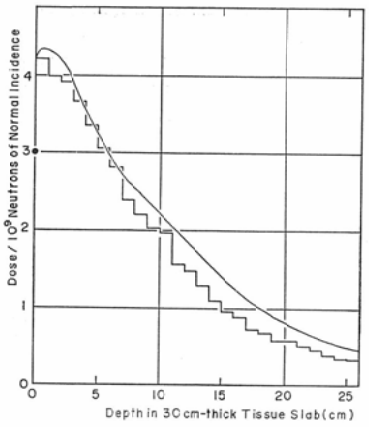
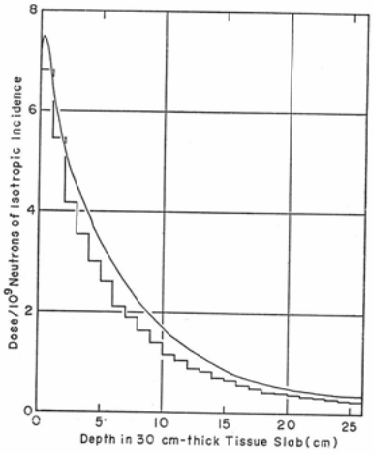


Fig. 6. Depth dose in 30 cm thick tissue calculated for the isotropically incident neutrons from thick target ^{9}Be(d,n)^{10}B reaction at 2.8 MeV. Histogram for 2 MeV isotropically incident neutrons.

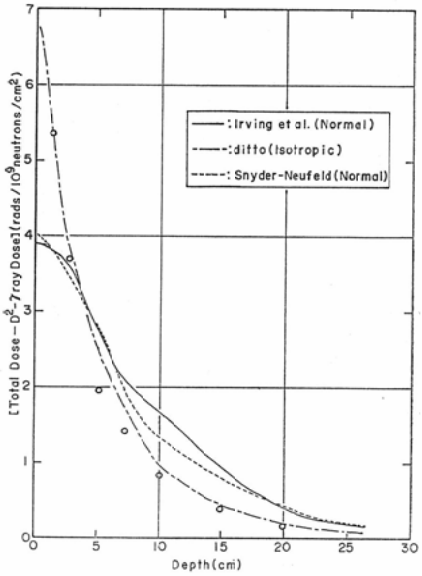


エネルギーで近似することを考えて，2MeV の単色中性子の入射に対する線量分布を併せてヒストグラムで示した．比較的入射面に近い部分ではこの平均エネルギーによる近似が成立する．

(2) 電離箱による測定

前項で線束と換算値によつて中性子線量を求めた場合の幾何学的条件において電離箱を用いた線量測定をおこない，その結果を前項の結果と比較した．この電離箱を用いて治療条件での照射野の

Fig. 7. Depth dose without γ-ray dose. Solid line and dotted line calculated on the data due to Irving et al. and due to Snyder and Neufeld, respectively, for normally incident neutrons from thick target $^{9}Be(d,n)^{10}B$ reaction at 2.8 MeV. Broken line on the data due to Irving et al. for isotropically incident neutrons, in comparison with the experimental results for isotropic approximation.



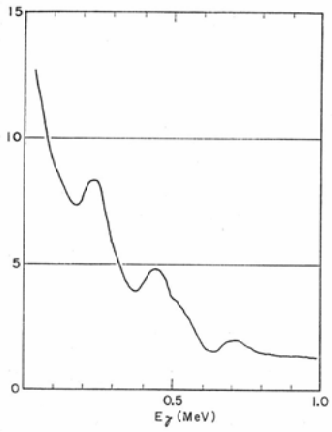
測定を試みた（VI節）.

電離箱は速中性子の空間分布を乱さない程度に充分小型の指頭型で，内径7 mmの Tissue equivalent chamber および同型の Carbon-CO_2 chamber の対からなるいわゆる "twin (paired) chamber"[4] である．この電離箱を空間においた場合にはその場の first collision dose を与えることを期待できる．その測定結果を同じ位置での中性子線束の測定から求めた first collision dose と比較して，測定誤差±5％の範囲での良好な一致が確かめられた．さらに電離箱を用いて深部線量を測定し前項での計算結果との比較を試みた．厚さ30 cmの水ファントムの前面壁にFig. 1に示したターゲットを接して照射した場合について，ファントム内の中心軸上での深部線量を測定した．この照射条件では，ターゲットからの中性子発生が厳密には4πに等方的ではないが，浅い部分では前項の計算における isotropic incidence に対比しうるものである．"twin chamber" の特徴から中性子線量のうちで中性子捕獲および非弾性反応から生じたγ線々量が高ＬＥＴ粒子による線量と区別されて求められるが，入射線中に含まれるγ線々量との和として与えられる．したがつて前項の計算値との比較には高ＬＥＴ線量によるのがよい．Fig. 7がその結果で，○印がγ線々量を除いた測定値で，鎖線が前項の isotropically incidence の場合の深部線量値から水素の中性子捕獲反応，H(n, γ)Dに伴つて生ずるγ線々量を除いた計算値である．なお同様の高ＬＥＴ線量を normally incidence の場合について ref. (3)によつて計算したものが実線で，ref. (2)によつて計算した結果（点線）との差を示す．

(3) γ線々量

前項で計算値と実測値との比較では除外されたγ線による線量寄与はそれが（i）「入射中性子のみに起因するもの」については (2)項の計算における全線量との差で与えられる．しかし実際に

Fig. 8. Pulse height distribution of mixed γ-rays obtained by 3 in. dia. ×3 in. NaI scintillator.



は (ii)「線源およびその周辺で発生するγ線とX線」が中性子線とともに入射する．これらの低ＬＥＴ線量の和が "twin chamber" によつてえられるγ線々量である．(i)による線量は入射中性子と被照射体に特有なもので入射中性子の線質にも関係し，全線量に対する相対寄与は深部にゆくにしたがつて増加する．これは中性子の減速に

ともない捕獲反応確率が増加するためである．(ii) のX，γ線の線質は中性子線源および照射位置によつてきまり，たとえば筆者らの装置では3″φ×3″Na I 検出器について Fig. 8 に示すような波高分布で与えられる．低エネルギーにすそをひいて増加する連続X線のスペクトル上に3つのγ線ピークが観測される．230keV のものはターゲット冷却水や周辺の物質中の水素との $^{1}H(n,\gamma)^{2}D$ 反応によるγ線の後方散乱線で中性子照射場に混在するγ線スペクトルに普通のものだが照射層件により大きさが異なる．430 keV，720 keV 附近のピークは中性子発生反応に伴う $^{7}Be^{*}$ および $^{10}B^{*}$ の遷移γ線であると考えられる．このスペクトルから平均γ線エネルギーは約 400 keV と求められる．このようなγ線による線量が "twin chamber" によつて求められターゲット前方30㎝以内で速中性子線量 (first collsion dose) の20%であつた．また5～10㎜厚の鉛でターゲットを遮蔽したた場合速中性子線量の減少は3%以下であるが入射γ線々量をそれの13～10%にまで減らすことができた．これは原子炉による速中性子照射に伴うγ線々量寄与と同程度である[6)7)]．

(4) 深部線量測定に対する考察

組織内深部における速中性子線量を指頭型電離箱で測定する場合に，以下に述べるような二，三の問題点があつた．

その1は速中性子線に混つて入射するγ線 ($\gamma_{inc.}$) と組織内の主に水素原子による捕獲γ線 (D^2-γ) との寄与を分離できないことである．したがつてモンテカルロ法による計算値との比較は D^2-γ の寄与を除いたものでおこなわれた．第2は発生する荷電粒子の飛程が短いので，一方の電離箱の内壁表面物質は中性子に対し厳密な組織等価性を保つ導電性物質でなければならない．とくに水素と窒素の含有量において等価であることが望まれる．γ線用電離箱は水素を含まずに次の3に述べる理由で低Z物質を用いる必要がある．実際にはグラファイト電離箱に炭酸ガスを充填した．その3は "twin chamber" における中性子線，γ線に対する感度がそれぞれのエネルギーに依存することである[5)]．それゆえたとえばγ線用電離箱壁に高γ物質を用いればエネルギー依存性を大きくする．"twin chamber" による線量の決定には場の中性子線 (En ≧ 10 keV) およびγ線のエネルギー分布の知識を必要とする．ここではとくにファントム内の平均エネルギーの推定に近似的な取扱いをおこなつた．

次に計算と比較するうえでの幾何学的条件の問題があつた．Snyder, Neufeld[2)] による計算は垂直入射する平行中性子線に対するものでこれを無限平板に対して満足させうることは困難で実験上の誤差が多い．この点で ref.(3)による isotropic incidence での計算との比較をおこなうことがより容易である．実験に使用した中性子線源は Fig. 2 (○印) で示したように完全に isotropic ではなく前方に強い放出があるために計算値より深部でやや低い値を示した．また無限平板についてここでの実測においてどの程度幾何学的にその条件を充たすかについて検討された．いずれも厚さ30㎝で縦，横が25，50および 100㎝の水ファントムに点線源入射をおこなつた．各深部における測定値を無限平板まで外挿して Fig. 7 の測定値とした．25㎝ファントムの測定値に対し深さ25㎝での外挿値の増加量は5%以下であつた．

IV. 中性子線のコリメーションおよび線量分布

(1) 中性子線の減弱．

ここで用いられる厚いベリリウムの (d, n) 反応からの速中性子線について，ターゲットからの距離 (TSD) による線量変化およびいくつかの物質の遮蔽効果を実測した．表面のきれいな1㎜厚のベリリウム板に 2.8MeV に加速した重陽子ビームを 200μA 入射した (560W) 場合のTSDによる線量の変化を空中で指頭型 "twin chamber" を用いて測定した．この場合の D^2-γ線の線量寄与は充分小さく，値から除いてある．Fig. 9 に示すようにえられた毎分線量率は逆二乗則を充たすものであつた．ターゲットは厚さ5㎜の鉛でγ線遮蔽をおこなつたがγ線々量寄与は10～15%の間にあり，測定誤差の範囲内で殆んど一定であると考えられた．

遮蔽材として水素を多く含む種類の物質によ

Fig. 9. Dose rate distribution along the central ray. Dose rate is expressed in rads per minute for the incidence of 200 uA deuteron beam of 2.8 MeV on a thick target of beryllium.

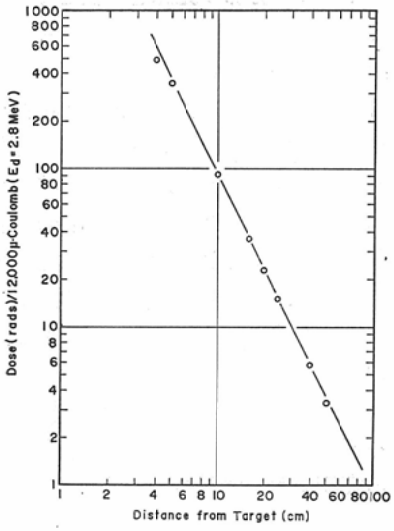
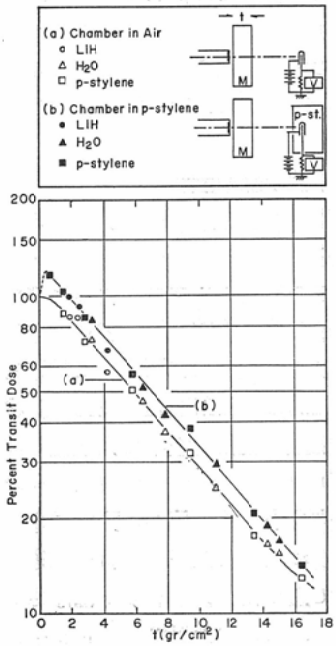


Fig. 10. Transmission dose and transit dose curves for fast neutrons through light materials.

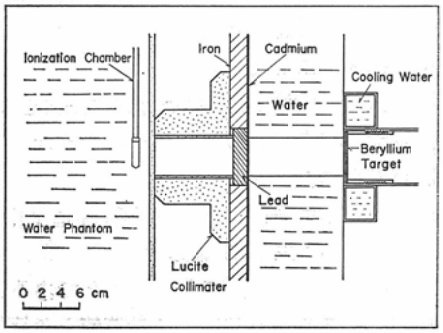


る効果が比較された．線源から50cmの距離に指頭型"twin chamber"をおき，その間に遮蔽材をおいて，その厚さに対する減弱を空中およびファントム内深さ2cmにおける線量により求めた(Fig. 10)．図の(a)は空中での線量の減弱曲線で物質の遮効蔽果はこれによつて充分よく与えられるが，実際にファントム中の線量を求めると(b)のようにやや高い値になる．これはICURで定義されたTransit dose[8]に相当するものである．用いた遮蔽物質(M)は水素化リチウム(LiH)，水およびポリスチレンで30×30cmの大きさである．Vは振動容量電位計を示す．LiHがやや効果的のようであるが密度が小さく($\rho = 0.816$)，取扱いが面倒なことを考えると有利ではない．結局水を用いるのが簡便で充分速中性子コリメータションが可能である．実用時にはこれに硼酸を溶解させて効果を増すことを考えている．

(2)　照射筒

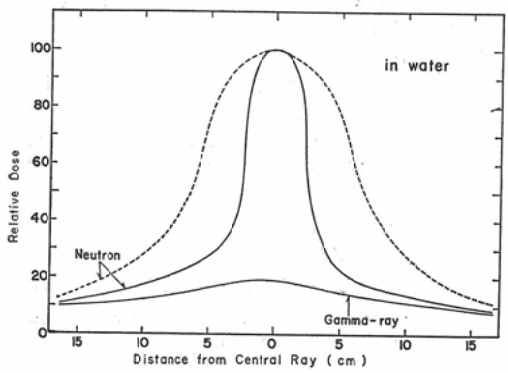
このような速中性子線を治療に用いる場合，照射野を限定することが問題になる．速中性子線の遮蔽にはかなりの厚みの物質層を必要とするため

Fig. 11. Arrangement of targetholder, collimators and water phantom.

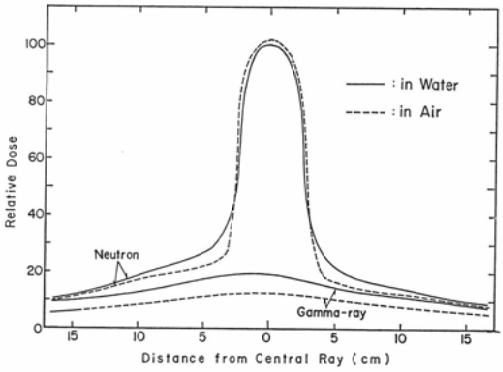


に，照射野を判然と定めることと，線量率を低下させないこととは相反する．治療に要求される線量率を最低20rads/min.と仮定すると，Fig. 9によつてTSDは20cm以下でなければならない．例えばStoneら[9]は60mmφのコリメーターを用いているのでこの程度の直径の中性子線を，上に与えられた距離以内の遮蔽によつて作ることを考えた．Fig. 11に用いた方法の概略を示す．厚さ100mmの水タンクに直径40 mmφの孔をあけてターゲットに接して冷却をかねたコリメーターとした．これに0.5mmのカドミウムおよび20mmの鉄板を重

Fig. 12. Lateral dose distribution at 2 cm depth in water for collimated neutrons, with (solid curve) and without lucite collimator (broken curve). Distribution of γ-ray dose is also shown below.



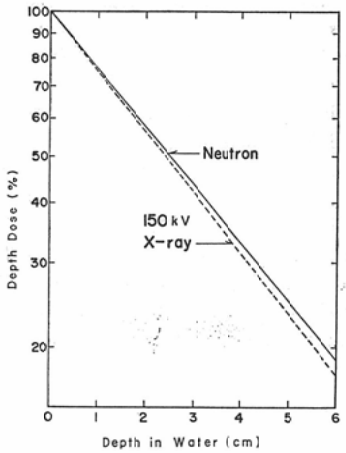
Fsg. 13. Lateral dose distribution at 2 cm depth in water(solid curve)and at the same position in air (broken curve) with lucite collimator. Distribution of γ-ray dose are also shown below.



ね，それぞれ遅中性子およびγ線を遮蔽した．ビーム孔は鉄に代えて鉛円板を用いた．

このような条件において，ターゲットから20cmの前方でビームに垂直な面内の線量分布を測定した．Fig. 12の破線で示したものである．コリメーター効果は鮮明でない．さらに照射筒をかねて透明なルサイトのコリメーターを適用した．ターゲットより前方20cmで水ファントム内2cmのビームに垂直な面内での線量分布は Fig.12に実線で与えたようなものである．Fig. 13に，同じ位置における空中での線量を水ファントム内線量と比較

Fig. 14 Percent depth dose curve in 30 cm water phantom for collimated neutron with lucite collimator (solid curve) and comparative representation of the depth dose for 150 kV X-ray (broken curve).



してある．中心軸上の線量値は殆んど等しいが，側方で水中の場合にみられる線量減少は中性子の減速部分が強くきいてくるものと考えられる．また散乱によつて水中でのコリメーションが不明瞭になる様子がみられる．水中におけるγ線々量の増加は D^2-γ線の寄与である．

この条件を用いて水中での中心軸に沿つた深部線量率分布を求めた．Fig. 14の実線で示したものである，比較のためにこれと同程度の減弱を示すX線を求めると 150 kV（HVL 3 mmAl，FSD＝20cm，5×5 cm^2）の場合（点線）に相当した．

V. 総　括

静電型加速器を使用して，厚いベリリウムでの（d，n）反応（Ed＝ 2.8 MeV）からえられる速中性子線は簡便でかつ安定な照射に利用できる．この線源について，

（1） 線量の測定方法を確かめ深部線量分布を計算および実測から求め比較した．

（2） 期待される線量率はターゲットに近接した照射で 400rads/min.，20cmで20rads/min. である．混在するγ線々量は10～15%であつた．

（3） 治療えの応用を考えてターゲットから，20cmにコリメーターされた円形照射野についての線量分布が求められた．

本稿を終るに当り，御協力いたゞいたヴァン・デ・グラーフのスタッフ山崎，三輪両技官に謝意を表する．

文　献

1) Inada,T., Kawachi, K. and Hiramoto, T.: Neutron from Thick Target Beryllium (d,n) Reactions at 1,0 MeV to 3.0 MeV. J. Nucl. Sci. Technol. 5 : 1, 22—29 (1968).
2) Snyder, W.S. and Neufeld, J.: Protection against Neutron Radiation up to 30 MeV NBS Handbook 63 (1957).
3) Irving, D.C., Alsmiller, R.G. Jr. and Moran, H.S.: Tissue Curret- to- Dose Conversion Factors for Neutrons with Energies from 0.5 to 60 MeV. ORNL- 4032 (1967) and Nucl. Instr. Meth. 51:129—135 (1967).
4) Rossi, H.H. and Failla, G.: Tissue-Equivalent Ionization Chambers. Nucleonics 14: 2, 32—37 (1956).
5) Matsuzawa,H.: to be published.
6) Simpson, R.E., Hightower, D. and Jonei, E.O.: The Mixed field Dosimetry in a Neutron Exposure Volume of a Modified Research Reactor. Health Phys. 15 : 15, 269—274 (1968).
7) Mobley, T.S., Engel, R.E. and Godden, W. R.: In Vivo and Air Dosimetry of Fission-Spectrum Neutrons. Biological Effects of Neutron and Proton Irradiations. Vol. 1 : 103 — 116 (1964) (IAEA, Vienna, 1964) STI/PUB/80.
8) Physical Aspects of Irradiation. NBS Handbook 85 (1962).
9) Stone, R.S. and Larkin, J.C., Jr.: Treotment of Cancer with Fast Neutrons. Radiolgy 39 : 608— 620 (1942).